

科学衛星磁気試験装置（2号機）による  
「ひのとり」の磁気試験と軌道上における姿勢ドリフト

二宮 敬虔・広川 英治・池田 雅彦\*・佐藤 信雄\*

(1982年5月6日受領)

Magnetic Test of The Scientific Satellite "HINOTORI" by  
Magnetic Test Equipment (II) and The Attitude Drift in Orbit

By

Keiken NINOMIYA, Eiji HIROKAWA, Masahiko IKEDA, and Nobuo SATO

**Abstract:** To cope with the increase in weight and size of the ISAS' scientific and engineering-test satellites, the Magnetic Test (measurement of magnetic properties) Equipment (II) was designed and built to replace the old Equipment (I) that had been used to measure and trim the magnetic moment of Satellites TANSEI (1971-011A) through HAKUCHO (1979-014A) as well as those of their on-board instruments. The main features of the Equipment (II) are (i) the increased handling capacity of weight and size of tested satellite with essentially unchanged measurement accuracy, and (ii) the microprocessor-based automatic measurement capability and operational safety implementation enabling the improvement in overall efficiency in operation.

The newly built Equipment has successfully been applied to the magnetic test of HINOTORI (1981-017A).

In this report, the description of the Magnetic Test Equipment (II) at ISAS, the magnetic test of Satellite HINOTORI using the Equipment, and the in-orbit attitude drifts of HINOTORI's angular momentum axis due to the residual and the adjusted bias-magnetic moments are presented to verify the Equipment performance and to

---

\* 日立製作所戸塚工場宇宙開発部

point out several factors of importance in the magnetic test of artificial satellites.

## 1. はじめに

前回報告 [1] した科学衛星磁気試験装置 (1号機) は, 1971年完成以来, 部品レベルの測定はもとより「でんぱ」「たんせい2号」「たいよう」「たんせい3号」「きょっこう」「じきけん」「はくちょう」等の科学衛星や試験衛星の搭載機器やシステムの磁気モーメント測定や残留磁気モーメントの補正に用いられてきた。その間, ジンバルを2回改造してロケットの軌道投入能力の増加による衛星の大型化に対応してきたが, 球形コイルの形状から限界があった (衛星直径 1.1 m, 重量 150 kg, まで測定可能であった)。

そこで, 今後の衛星開発計画及び設置場所を参考に, M-3S型以降のロケットによって打上げられる科学衛星のために, 高さ約 1.2 m, 直径 1.5 m, 重量 300 kg まで測定可能な2号機を設計した。

この2号機の測定方式は雑音が容易に除去でき, 較正が簡単で正確な回転式とした。球形コイルは1号機の1.5倍のスケールアップを計った。しかし, 測定精度等の性能は, 装置が設置される場所の磁気的環境を考えると向上させることが困難であること, また今後の科学衛星では能動的姿勢制御方式が採用されるので現状の精度でまず満足できることなどの理由により, 1号機と同程度とした。ただし, 操作性の向上による測定の能率化, 省力化をはかることとしてマイクロコンピュータを系に導入することにより自動測定を可能とした点が特徴である。

本報告では, まず磁気試験装置 (2号機) による人工衛星磁気モーメントの測定原理および装置の概要を説明し, 次に試験装置の各機能の試験結果及び第7号科学衛星「ひのとり」の磁気モーメント測定結果を報告する。さらに, 打上げ後の軌道上における「ひのとり」の姿勢のドリフトの観測より推定された残留磁気モーメントと地上試験時に得られた値の観点から比較検討することによって, 磁気試験機による磁気能率の測定時に注意すべき事項を指摘する。

## 2. 測定方法

一部前回報告 [1] と重複するが, 装置の原理, 測定の方法, 手順について述べる。

### 2.1 磁気モーメントの測定

球形コイル内で磁気モーメントを回転させ, 磁気モーメントによる磁束が球形コイルの検出用コイルと鎖交することにより検出用コイル内に誘起電圧が発生する。この電圧を測定することにより磁気モーメントを求めることができる。誘起電圧と磁気モーメントとの関係は測定される磁気モーメントの種類により異なり, 以下に述べる。

#### 2.1.1 磁石等により発生する一定方向磁気モーメントの測定

これは衛星の有する磁気モーメントの大半を占めるとされるもので永久磁石等の残留磁気により発生する磁気により発生する。これらのモーメントと誘起電圧との関係は次のように求められる。

回転体の渦電流より発生する磁気モーメントを除くため無磁界中で測定が行なわれる。ところで図1に示す球形均一磁界発生用コイルによって球内に発生する磁界 $H$ は(1)式に示す均一磁界となる。[2]

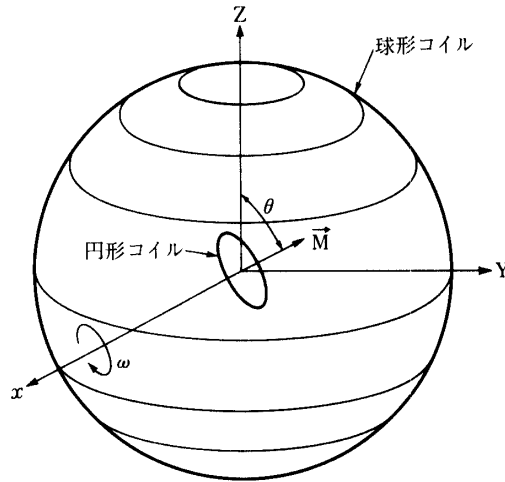


図1 測定原理

$$H = \frac{NI}{3R} [AT/m] \dots\dots\dots (1)$$

- ただし  $N$  : 球形均一磁気発生用コイル全巻数
- $I$  : 球形均一磁界発生用コイル電流
- $R$  : 球形コイル半径
- $H$  : 球形コイル軸方向磁界  
( $Z$ 軸方向)

従って球形コイル軸を地磁気方向に一致させて地磁気を打消す電流を流すことにより、球形コイル内を無磁界とすることができる。ここでは磁気モーメントを内部の円形コイルで発生させるとする。図1に示す球形コイルには均一磁界発生用コイルと同軸に検出用コイルが巻かれている。この検出用コイルと内部の円形コイルとの間の相互インダクタンスは(2)式で示される。

$$m = \frac{\mu_0 N_r N_s A \cos \theta}{3R} [H] \dots\dots\dots (2)$$

- ただし  $N_r$  : 円形コイル巻数
- $N_s$  : 球形検出用コイル巻数
- $A$  : 円形コイル面積
- $\theta$  :  $Z$ 軸と円形コイル面垂直方向との成す角度
- $\mu_0$  : 真空透磁率

内部円形コイルに電流  $I_r$  を流せば(3)式に示す磁気モーメント $M$ を発生する。

$$M = \mu_0 N_r A I_r [Wb \cdot m] \dots\dots\dots (3)$$

(3)式の $M$ によって発生する磁束が球形コイルと鎖交する数は(2)式より(4)式で示される。

$$\phi_s = \frac{NsM \cos \theta}{3R} [Wb] \dots \dots \dots (4)$$

図1に示すように円形コイルを $X$ 軸の回りに $\omega$ なる角速度で回転させると球形検出用コイルには(5)式で示す電圧 $e$ が誘起される。

$$e = -\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{Ns\omega}{3R} \cdot M \cdot \sin \omega t [V] \dots \dots \dots (5)$$

したがって(5)式より誘起電圧を測定することにより回転軸と直角方向の磁気モーメント成分を求めることができる。

本装置では $\omega$ を一定(60 RPM)にし、(6)式に示すように電圧波形の最大値を測定する。 $K$ は $M$ の既知コイルにより較正される定数である。

$$E = \frac{Ns\omega}{3R} \cdot M = KM [V] \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 $E$ : 最大値

$K$ : 定数

さて、実際の衛星が有する合成磁気モーメントは、次に示すようにその大きさと方向が測定される。

合成磁気モーメント( $\vec{M}$ )の中心が衛星内任意の点にあっても(2)式は成り立つので、

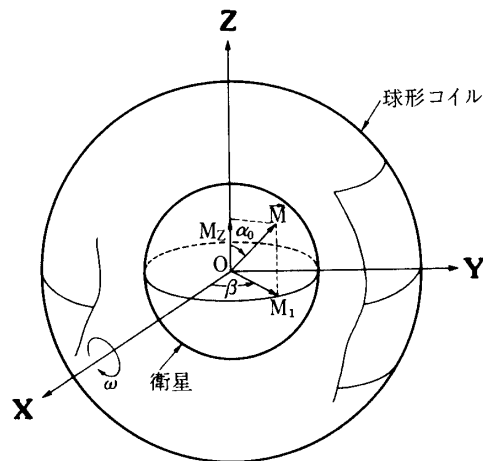


図2  $\vec{M}$ の大きさと方向の測定

図2に示すように磁気モーメントの中心が球形検出コイルの中心にあると考えても(6)式の関係は変わらない。

図2において、 $X$ 軸と $\beta$ なる方向に $M$ がある場合、 $X$ 軸回りには $\omega$ なる角速度で回転させる球形コイルには(7)式で示す電圧 $e$ が誘起される。

$$e = K \sqrt{M_z^2 + (M \perp \sin \beta)^2} \cdot \sin \left( \omega t + \tan^{-1} \frac{M \perp \sin \beta}{M_z} \right) [V] \dots \dots \dots (7)$$

ただし  $M_z$  :  $\vec{M}$  の Z 軸成分  
 $M_{\perp}$  :  $\vec{M}$  の XY 面内成分

最大値  $E$  は (8) 式となる

$$E = K\sqrt{M_z^2 + (M_{\perp} \sin \beta)^2} = KM[V] \dots\dots\dots (8)$$

したがって  $\beta$  を変えて、すなわち衛星を Z 軸の回りに回して各々  $e$  を測定する。その時  $\vec{M}$  と  $\alpha$  を同時に以下の方法で求める。

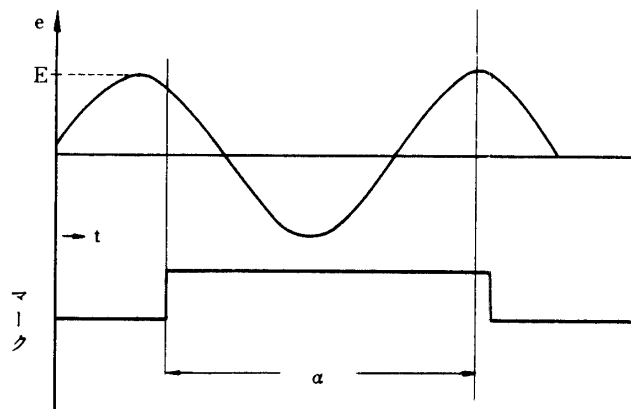


図3  $\alpha$  の測定

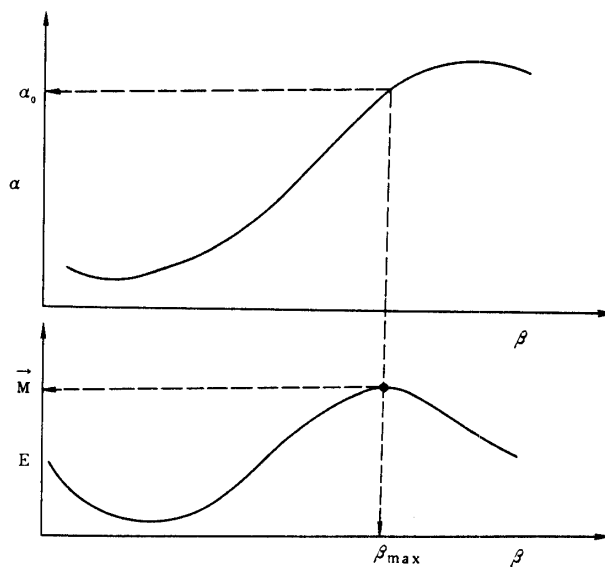


図4  $\vec{M}$ ,  $\alpha$  および  $\beta_{max}$  の測定

$e$  とジンバル回転軸の基準パルスを 2 チャンネルの感熱式レコーダに書かせる図 3 に示す図形が得られ、この図形より  $e$  の最大値  $E$  および基準パルスからのずれ  $\alpha$  が求まる。

次に  $\beta$  を横軸に、 $\alpha$  および  $E$  を縦横にプロットして、図 4 のグラフを求める。このグラ

より  $E$  の最大値から、 $\vec{M}$ 、その時の  $\alpha$ 、 $\beta$  の値から、磁気モーメントの方向  $\alpha_0, \beta_{\max}$  が求まる。

### 2.1.2 軟磁性体等により発生する磁気モーメント (パーミアブルな磁気モーメント) の測定

衛星内に軟磁性材料が含まれると地磁気により磁化され磁気モーメントが発生する。これら磁性体の分布の合成が図5に示すかたち (長軸と短軸との比が大きい棒状等) であれば次のように測定することができる。

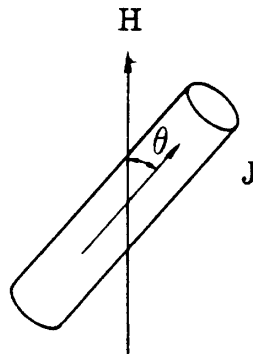


図5 棒状磁性体の磁化

図4において棒状磁性部の磁化は長軸方向だけを考えると (11) 式となる。

$$J = \frac{x}{1+xN} H \cos \theta [Wb/m^2] \dots \dots \dots (11)$$

ただし  $x$  : 磁性体平均磁化率  
 $N$  : 長軸方向平均反磁界係数  
 $H$  : 外部磁場  
 $\theta$  :  $H$  と  $J$  の成す角度  
 $J$  : 長軸方向平均磁化

全体の磁気モーメントは (12) 式となる。

$$M = VJ = Mo \cos \theta [Wb/m] \dots \dots \dots (12)$$

ただし  $V$  : 磁性体体積  
 $Mo$  : 長軸方向に磁化された時のモーメント

図6に示すように球形コイル軸と地磁気方向を一致させコイル内に任意の磁界 (本装置では  $0 \sim 40 \text{ Öe}$ )  $H$  を発生させる。図6において  $X$  軸の回りに  $H$  によって磁化されている磁性体を  $\omega$  なる角速度で回転させると、

$$\phi_s = \frac{Ns \cdot Mo \cos^2 \theta}{3R} [Wb]$$

であるから球形検出用コイルに誘起される電圧は (13) 式となる。

$$e = KMo \sin 2\omega t [V] \dots \dots \dots (13)$$

したがって (13) 式より誘起電圧を測定することにより、回転軸と直角方向成分の磁気

モーメントの大きさを求めることができる。磁性部が衛星内で任意の点にある場合は、2.1.1項と同様な操作をすることにより、大きさ、方向を求めることができる。

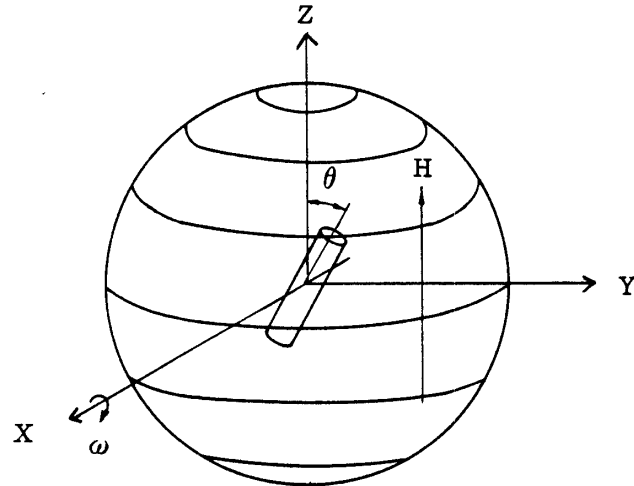


図6 測定原理

## 2.2 消磁

衛星の消磁を行なうには、球形コイルの均一磁界発生用コイルに直流電流を流し強磁界を発生させ、その中で衛星を回転させながら磁界を減少させて行なう。(図7) この場合、衛星には図8に示すように、大きさの減少する磁界が正負交互にかかることになり図9に示すように直流消磁(衛星を回転する)ことができる。

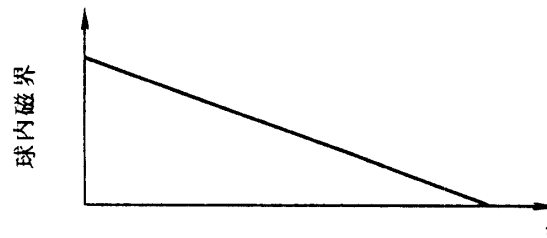


図7 減少磁界

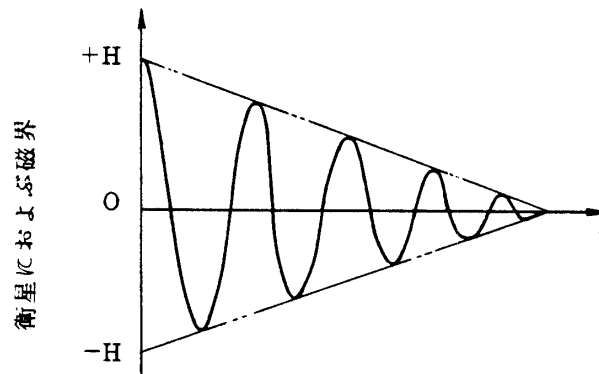


図8 消磁磁界

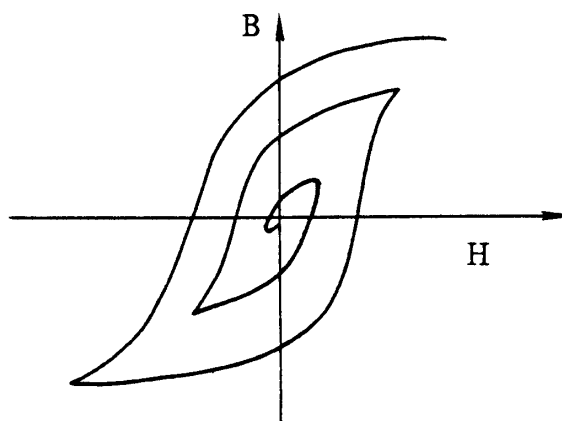


図9 ヒステリシス減磁曲線

### 2.3 均一磁界発生

磁性体の静磁特性を測定するために、2.2で述べたと同様に、球形コイルの均一磁界発生用コイルに直流電流を流し、40 Öeまでの強磁界を発生させることができる。

## 3. 装置の構成

本装置は大別して球形コイル、駆動部、回転制御部、計測制御部、磁気制御部、消磁制御部から構成されており、図10にブロック図、表1に主要機能を示す。球形コイルは非磁性体を使用し、駆動部は球形コイルから離して設定してある。また、球形コイルは被測定物の搬入搬出のため、南半球、北半球とも分割できる構造とした。

### 3.1 球形コイル

球形コイルは、3.3 mφの球面上に対称に8コイルずつ計16コイルに分割されている。コイルの間隔は200 mmで、各コイルの直径はそれぞれ約3.3 mφ、3.2 mφ、3.1 mφ、3.0 mφ、2.8 mφ、2.5 mφ、2.0 mφ、1.4 mφとし、球形コイル内の磁界の誤差を最小としている。[2] 各コイルの仕様を表2にまとめた。

### 3.2 駆動部および回転制御部

駆動部はDCモータ、減速器、ドライブシャフト、タイミングベルト、ジンバル等より構成されている。DCモータに直結されたタコジェネレータ、回転制御部内のドライブユニット、加減速調整器によりサーボ系を構成し、ジンバルの回転の安定化を計っている。また回転速度の検出はコラム上にあるロータリエンコーダで行い、その結果を回転制御部にある回転速度計に表示している。

以上の関係の概要を図11のブロックダイヤグラムに示す。なお、ジンバルは、1ターンのコイルを構成しないように直流的に切っている。

また、各種インターロックをほどこし、安全性を確保しており、さらに加速度制限（加速及び減速）、回転速度の最大制限もほどこし、誤操作による測定物の損傷に対する保護を行なっている。



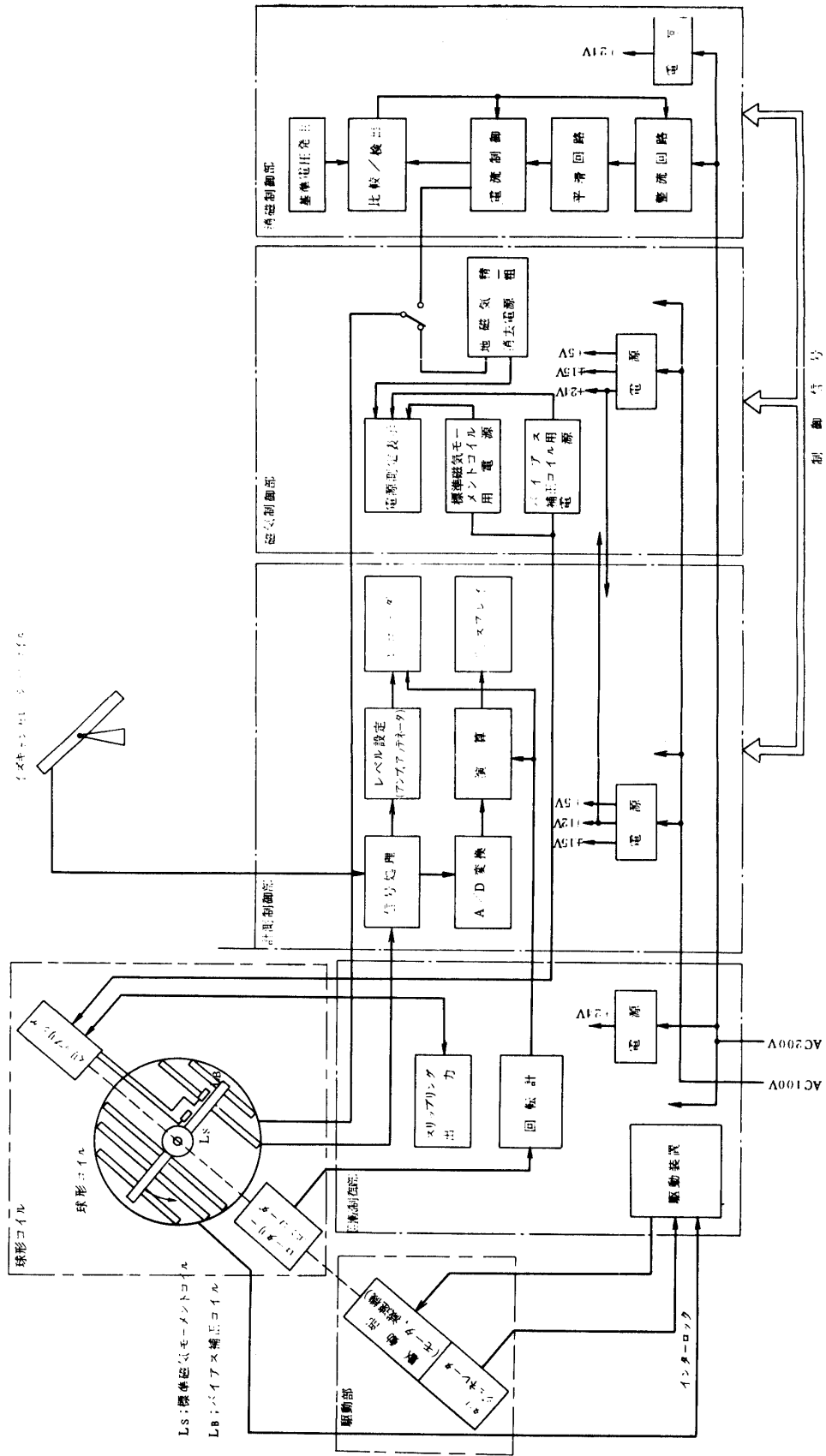


表1 構成品の主要機能

構成品	主要機能
回転制御部	入力電源のON, OFF ジンバル駆動用モータのON, OFFおよび速度制御 ジンバル駆動用モータの電圧電流の表示 ジンバル回転数の表示 スリップリングの出力
駆動部	被測定物保持および回転 ジンバルの駆動 ジンバル回転速度検出 スリップリング機能
球形コイル	均一磁界の発生 球形コイル内地磁気の消去 被測定物の磁気モーメントの検出
計測制御部	磁気モーメント信号の処理, 演算 磁気モーメント値および角度の表示
磁気制御部	標準磁気モーメントコイルへの電流供給 バイアス補正コイルへの電流供給 地磁気消去電流の供給 上記各電流の計測および表示
消磁制御部	均一磁界発生用および消磁磁界発生用電流の供給

表2 各コイルの仕様

コイル名称	仕様	目的
均一磁界発生用コイル	全巻数 9,600回 (60回×10層× 16分割)	地磁気消去 消磁 均一磁界発生
検出用コイル	全巻数 9,600回 (600回×9層× 16分割)	磁気モーメント測定用

### 3.3 計測制御部

計測制御部は検出用コイルにより検出された信号を処理し、磁気モーメント値 ( $\vec{M}$ ) 位相角 ( $\alpha$ ) を計算、表示すると共に感熱レコーダに出力しており記録として残せる。

#### (1) ハードウェア

図12にハードウェアの概要を示す。図12において検出用コイルにより検出された信号には50 Hz ノイズ、1~2 Hz ノイズが含まれている。

前者は、AC 100 V/200 V より発生する雑音を検出用コイルにて拾うものでフィルタにより除去する。後者は主として電車、エレベータ等により発生する雑音でほぼ信号と同一

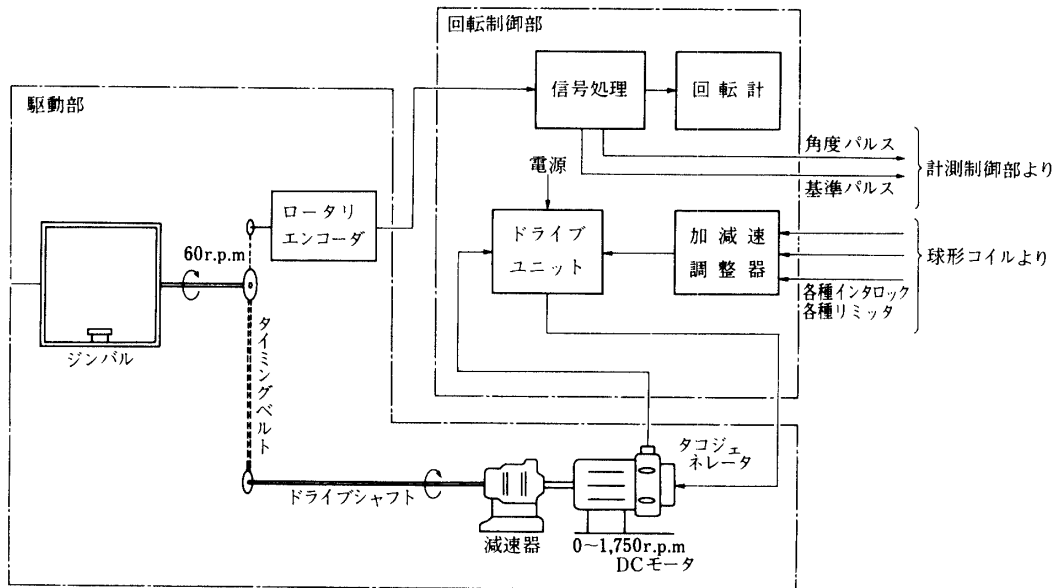


図11 駆動部および回転制御部ブロックダイヤグラム

周波数のため球形コイルと同一軸上に設けたノイズキャンセレーションコイルにより、同じ雑音をピックアップし、(逆極性にて) 加算することにより補正している。

前述により雑音除去をされた信号はバッファアンプ等によりレベル合わせを行い、2系

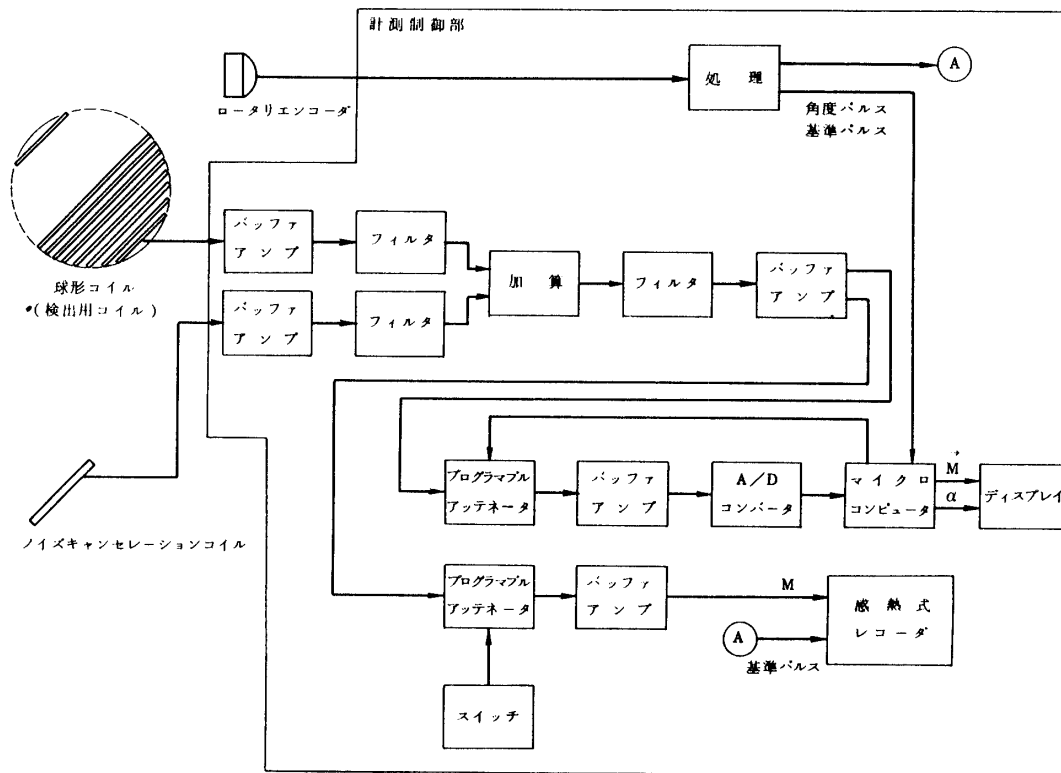


図12 計測制御部ブロックダイヤグラム

統に分け、一方は感熱レコーダにより記録し（手動式）他方はマイコンにより計算、表示される（自動式）。

手動測定では感熱式レコーダの指示を一定値になるようにプログラマブルアッテネータの値をスイッチにて切り替え、アッテネータの指示により磁気モーメント値 $\vec{M}$ に換算する。また、位相角 $\alpha$ はロータリエンコーダの出力を基準パルスとして感熱式レコーダに記録させ、図13に計算方法により換算する。

自動測定は前述の雑音除去された磁気モーメント値に比例する信号をA/D変換し、マイコンにより磁気モーメント $\vec{M}$ の値を計算する。

さらに、ロータリエンコーダからの基準パルスおよび角度パルス（ジンバル1回転を360等分した1度ごとのパルス）より位相角 $\alpha$ を計算、表示する。

## (2) ソフトウェア

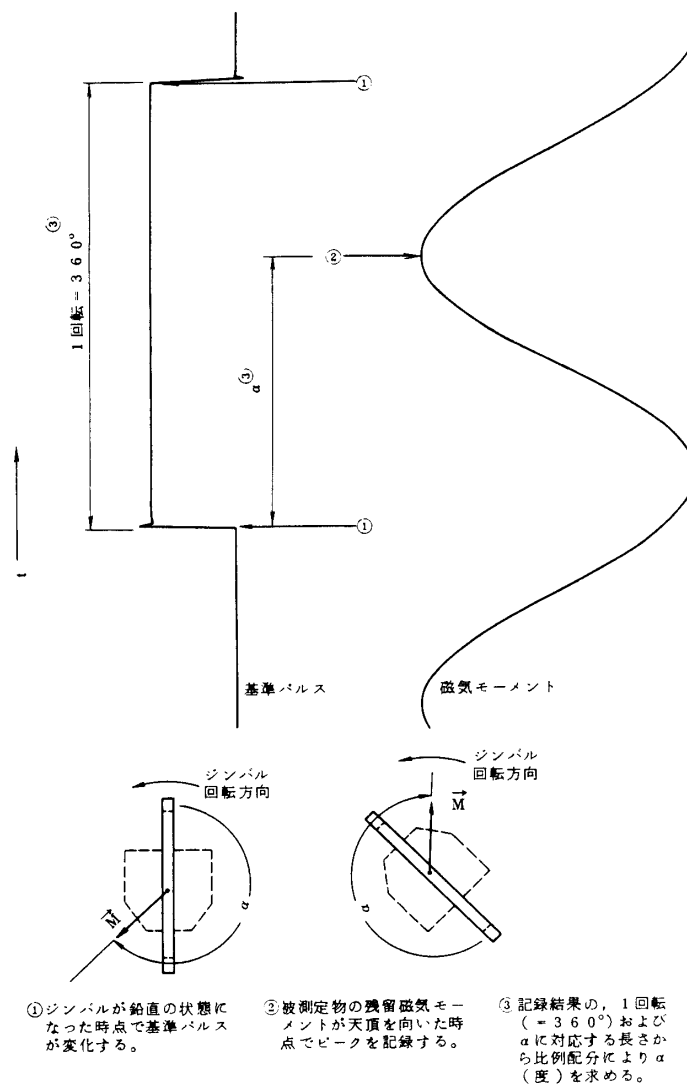


図13 手動測定の原理

## (a) ソフトウェアの機能

前述の雑音の除去された磁気モーメント値に比例する信号を入力し、まずその入力信号をA/Dコンバータに最適のレベルとなるようプログラマブルアッテネータの減衰値を決める。

次に1周期(1秒間)分の信号を入力し、DFT(Discrete Fourier Transformation)により、入力信号の1 Hz(または2 Hz)成分の振幅から磁気モーメント値 $\vec{M}$ に換算し表示する。同時に、基準パルスからの位相角 $\alpha$ を求め、表示する。さらに、次の1周期分の信号を入力し、表示することを128回くり返す。

この間は、それまでの入力信号の平均をとることにより、ランダムな雑音成分を打ち消し、より精度の高い測定値を求めている。

128周期(128秒間)分のデータを入力すれば、それ以上の信号の入力を停止し磁気モーメント値および位相角はそのまま表示している。

図14にフローチャートを、表3には各ルーチンの機能と概要をまとめた。

なお、CPUは8ビットマイコンHD46800を用いており、プログラムは2KBのPROMに収容されており、他に2KBのRAMが必要である。また、高速浮動小数点計算、三角関数の計算のために、専用素子を使っている。

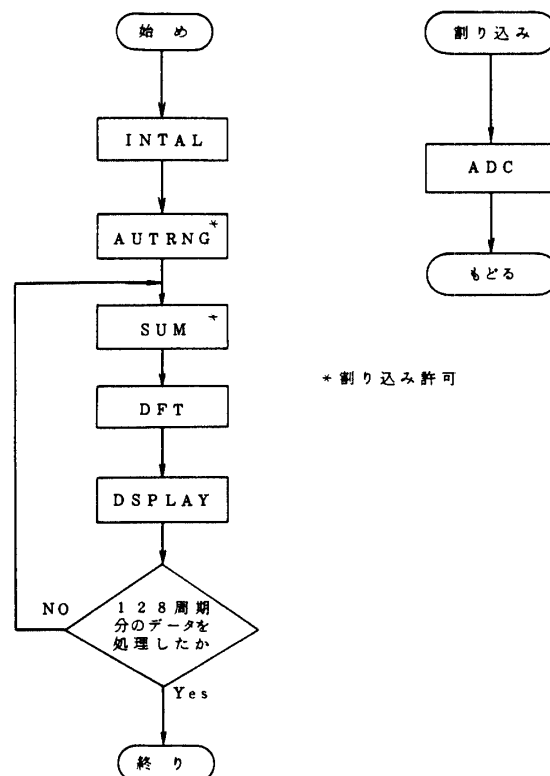


図14 フローチャート

表3 各ルーチンの機能と概要

ルーチン名	機能	概要
INTAL	パラメータの初期化	$BUFM 2(i) = 0$ 等
AUTRNG	入力レベルの最適化	プログラマブルアッテネータにより, 入力信号を 6 dB 以上に粗調整
SUM	1 周期分のデータごとに加算	$BUFM 2(i) = BUFM 2(i) + BUFM 1(i)$
DFT	DFT	$Re = \sum_i BUFM 2(i) * \cos(i)$ $Im = \sum_i BUFM 2(i) * \sin(i)$
DSPLAY	$\vec{M}$ , $\alpha'$ の計算および表示	$\vec{M} = \sqrt{Re^2 + Im^2}$ $\alpha' = \tan^{-1}(Im / Re)$
ADC	信号の入力	1 度ごとに信号を AD 変換し, 入力し BUFM 1(i) にしまう

### 3.4 磁気制御部

磁気制御部では, 地磁気消去用電源, 標準磁気モーメント発生用電源, バイアス補正コイル用電源, ジンバル回転と同期した 1 Hz 正弦波電流(軟磁性体測定のための較正時に使用)を発生する電源を有しており, その他に上記電源より供給される電流値を計測, 表示する電流計測機能を有している。

#### (1) 地磁気消去用電源

球形コイル内を無磁界とするために, 球形コイルに規定の電流を供給する。

#### (2) 標準磁気モーメント発生用電源

ジンバルに装着した標準磁気モーメントコイルにスリップリングを通して DC 電流を供給し, 既知の磁気モーメントを発生させそれにより較正する。

なおこの際標準磁気モーメントを選択したときは電流と同時に発生する磁気モーメント値も表示している。

### 3.2.3 消磁制御部

消磁制御部は消磁モードにおいて, 球形コイルに DC 電流を供給し, 消磁スイッチをオン後約 1 分間を要して設定値から 0 A へ直線的に漸減する定電流電源でありその容量は 320 V, 20 A を有しておりこのため 3 相 200 V より入力供給を受けている。

## 4. 較正結果

以下に本装置の較正結果を述べる。

### 4.1 消磁特性

図 15 に, 電流-磁界直線を示す。最大電流は 20 A で約 52 Öe に対応する。

また, 図 16 には, 磁界減少直線を示す。約 60 秒でほぼ直線的に減少している。

1.5 倍のスケールアップにもかかわらず, 1 号機とほぼ同一の磁界を発生できることが示される。

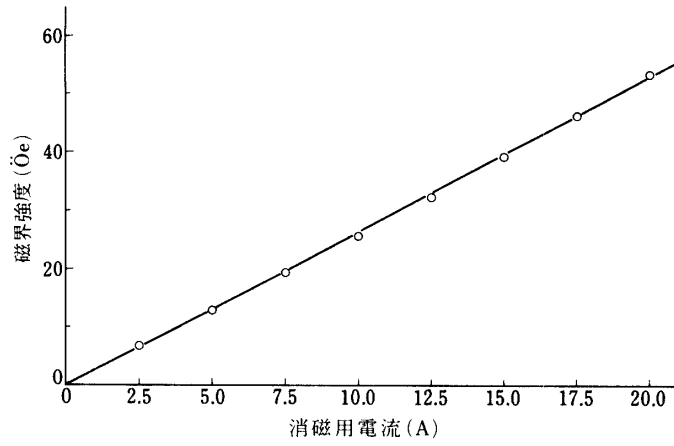


図15 電流—磁界特性

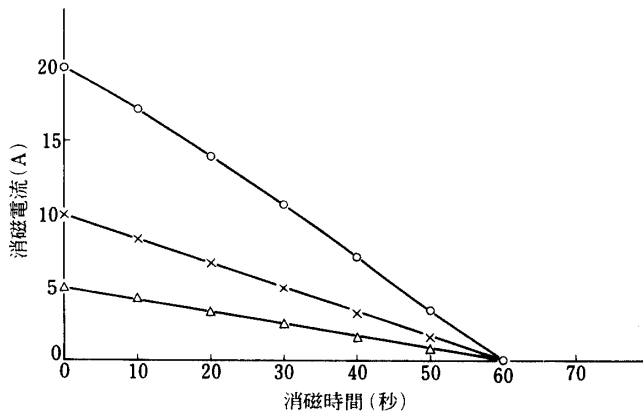


図16 磁界減少直線

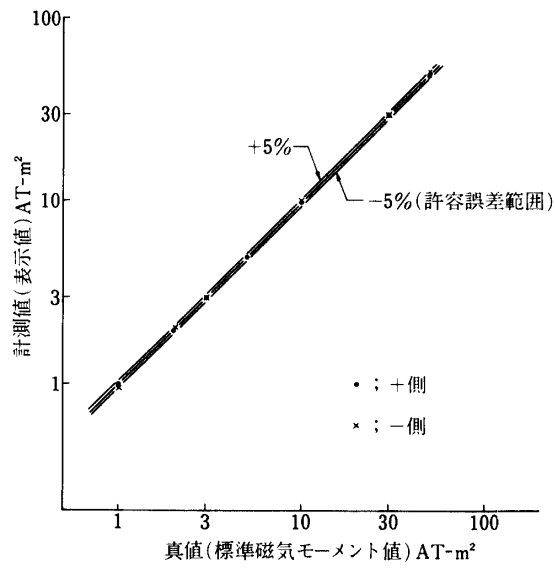


図17-1 較正結果 (一定磁気モーメント)

## 4.2 磁気モーメント較正結果

磁気制御部で発生させた較正用信号を用いた測定結果を示す。

### 4.2.1 一定磁気モーメント

図17に較正結果を示す。0.03  $\text{ATm}^2$  から 50  $\text{ATm}^2$  まで直線にのっていることがわかる。

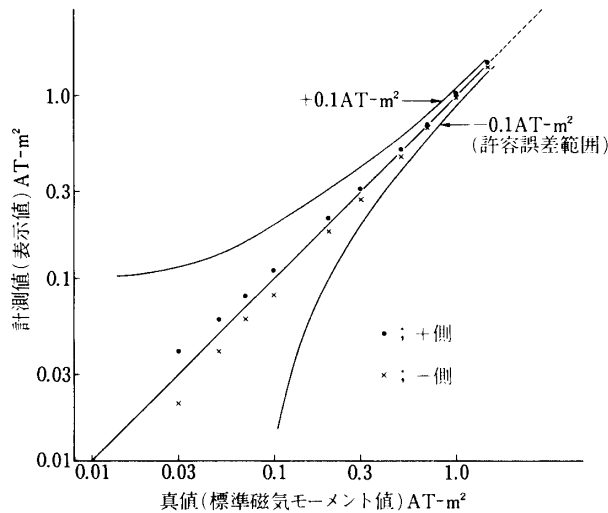


図17-2 較正結果 (一定磁気モーメント)

### 4.2.2 軟磁性体

図18に較正結果を示す。0.03~5  $\text{ATm}^2$  までほぼ直線にのっていることがわかる。

この較正試験の結果、構造物の大型化及び設置場所の制約による磁気環境の悪化等にもかかわらず、設計値通りの性能が得られていることが確認できた。

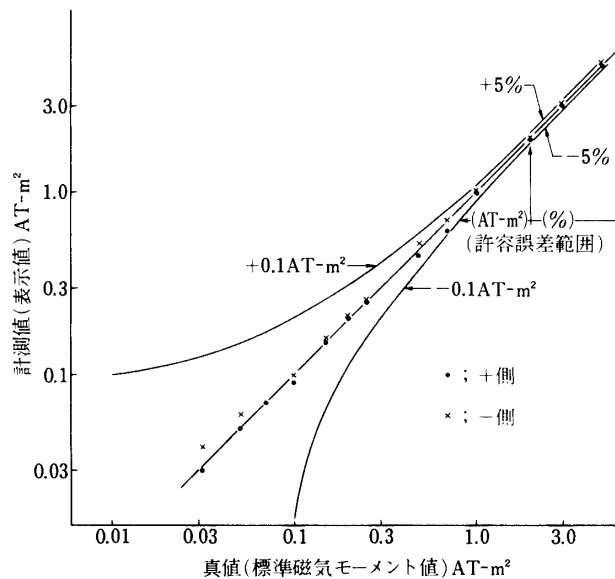


図18 較正結果 (軟磁性体)



## 5. 科学衛星「ひのとり」の磁気モーメント測定結果とその検討

表4, 表5に本試験機を使用して行なわれた「ひのとり」の測定結果を示す。

表4 「ひのとり」のMACの発生する磁気モーメントの測定結果

磁気トルカ	設計値(AT-m <sup>2</sup> )	実測値M(AT-m <sup>2</sup> )
MAC 強 +	+ 27.6	+ 28.5
“ -	- 27.6	- 28.0
中 +	+ 11.8	+ 12.2
“ -	- 11.8	- 12.2
弱 +	+ 5.1	+ 5.3
“ -	- 5.1	- 5.2

表5 「ひのとり」の運用モード別磁気モーメント測定結果

磁気モーメント		位相角 $\alpha$ (°)	方位角 $\beta$ (°)	大きさ M(AT-m <sup>2</sup> )	スピンの軸方向 Mz(AT-m <sup>2</sup> )	備考 パドル
A	衛星 -OFF MBC (50)*	+ 117	+ 68	- 0.21	- 0.10	収 納
B	観測モード MBC (50)	+ 150	+ 30	- 0.39	- 0.34	“
C	観測モード MBC (59)	+ 83	+ 30	+ 0.21	+ 0.03	“

\* MBC (50) は磁気モーメントとしては零

表4は衛星のスピンの軸方向に磁気モーメントを発生させる装置(MAC)の測定結果である。ここで、設計値とはコイルの面積、巻数及び電流値等から算出された値であり、実測値MはMACに通電して発生された磁気モーメントの大きさの測定結果である。

一方、表5は「ひのとり」の残留磁気モーメントならびに可変着磁バイアス制御装置(MBC)を用いた残留磁気モーメントの補償結果について示してある。表5の測定Aでは、衛星の電源を全てOFFした状態であり、MBCの磁気モーメント値も零になるように設定した場合の残留磁気モーメントの測定結果である。また、測定Bでは、定常の観測モードの状態であって、数種類の観測機器と共通機器が動作している場合の測定結果である。

ところで、「ひのとり」はスピン(5RPM)をしているため、残留磁気モーメントのスピンの軸方向成分Mzを極力小さくすることによって磁気トルクによる姿勢ドリフトを低減できる。そこで、測定Cでは、測定Bの結果(スピンの軸方向に-0.34[AT-m<sup>2</sup>])の残留磁気モーメントがあることが判明している)に基づいて、MBCを用いてこの残留磁気モーメントMzがなるべく零になるように補償した場合の測定結果である。

4及び5の測定結果より、単体での試験ならびに衛星の各種の試験について、いずれも予想通りの測定性能が実現されていることが確認できた。

なお、この測定を行なう際に次の事項が測定精度に影響したため、充分注意をする必要があった。

- (1) 回転時のジンバルの力学的アンバランスの修正。
- (2) 衛星を支持するための治具類の消磁及び磁気バイアス補正。
- (3) 衛星をジンバルに取付けた場合の衛星基準方向と標準磁気モーメントとの位相差の調整（マーカー位置の調整）。

上記の較正が不十分であれば、磁気モーメントの大きさ $M$ 及び方向 $(\alpha, \beta)$ が正確に測定できなくなるので、測定前にはこれらの誤差要因を注意深く取除かなければならない。

## 6. 軌道上における「ひのとり」の姿勢ドリフトと残留磁気モーメントの推定 [4]

### 6.1 軌道上における「ひのとり」の姿勢ドリフトの概要

「ひのとり」は太陽フレアの精密観測を行なうため、衛星のスピン軸が太陽の中心から $1.2^\circ \pm 0.5^\circ$ の範囲内にとどまるよう機上にて、自動的にオフセット指向制御されている。衛星残留磁気モーメント（以下 $M_R$ と略す）と地球磁場とから生ずるスピン軸のドリフトは、できるだけ $M_R$ が零になるように地上試験時に調節されているため、打上げ前の予想では、地球の年周運動による太陽の赤経の変化程度であろうと考えられていたが、実際には、予想よりやや大きめのドリフトが観測された。そこで、このドリフトの原因を明らかにすることができたので、これと地上における磁気試験結果と比較しながら以下に説明する。

### 6.2 機上制御時の姿勢決定法とドリフトの計測結果

太陽角が $1.2^\circ \pm 0.5^\circ$ の範囲外になった場合には自動的に制御が行なわれるので、 $1^\circ$ の変化範囲のドリフト状態しか観測できない。一方、「ひのとり」の一般姿勢センサであるデジタル太陽センサ、水平線センサ及び地磁気センサの各データでは、この $1^\circ$ 以内でのドリフトのようすを正確に把握するには精度が不十分なため、細かい姿勢変化の検出には次のような方法を採用した。

まず、スピン軸の方向を決定するため、全ての太陽に対する相対的な座標系、つまり太陽を中心とする極座標で、太陽からの離角 $\theta_s$ と方位角 $\phi_s$ （北を零とし、東回りの角度）を用いる（図19参照）。

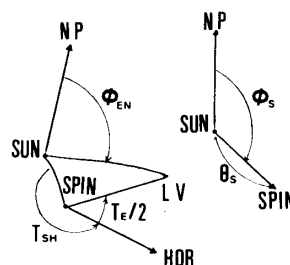


図19 太陽中心座標系

ここで、 $\theta_s$ の精密な計測は精密太陽姿勢計（略称SXA）によって行なわれる。SXAはモジュレーション・コリメータの原理を利用して、スリット上に結像された太陽像がコリメータのマスクによってON/OFFされる時刻を計測する装置である[5]。 $\theta_s$ はこの時刻

データを用いて正確に算出することができる（精度約 $0.01^\circ$ ）。

一方、 $\phi_s$ は次のようにして求めることができる。デジタル太陽センサが太陽に正対してから、水平線センサが地球を走査し始めるまでの時間差 $T_{SH}$ と、地球走査時間 $T_E$ 、およびスピン周期 $T$ が計測される。またこの時の太陽中心から見た地心方向と北極とのなす角 $\phi_{EN}$ は軌道計算ならびに太陽の位置計算より求めることができる。このようにして決めたスピン軸のドリフトの一例を図20に示す。この図20では、自動姿勢制御装置が動作中の姿勢のようすを示している。

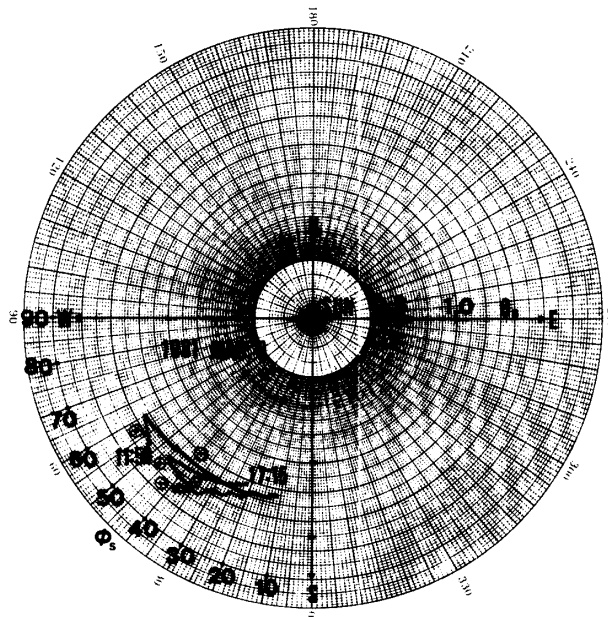


図20 姿勢決定結果の一例

### 6.3 ドリフトのシュミレーション

次に、このドリフトの原因を調べるため、考えられる外乱について検討を行なった。

「ひのとり」ではスピン軸が太陽方向に殆んど一致しているため、太陽輻射圧トルクは無視でき、また、重力傾斜トルクも慢性能率比が1に近いため無視できると考えてよい。一方、空力トルクについては600 km以上の高度であることを考慮すると磁気トルクに比べ殆んど無視できると考えられるが、正確にトルクを算出するには、衛星の表面の空力特性を全て把握しなければならないという難かしさがある。このため、まず磁気トルクによるドリフトが主要因と仮定してドリフトのシュミレーションを行ない、これで観測結果の説明がつけば空力トルクは実際上無視できると見なせると考えることにした。そこで、 $M_R$ の値を適当に変えて姿勢変化を理論的に予測し、計算された値と観測値を比較した結果 $M_R$ は約 $0.4 \pm 0.1$  ( $AT-m^2$ )と考えれば、計算値と観測結果が非常によく一致することがわかった。

### 6.4 磁気バイアス制御実験

このシュミレーション結果をさらに実験的に確かめるために、「ひのとり」でドリフト実験を行なった。「ひのとり」には、先に述べたように $M_R$ を補正し、ドリフトを極力少なく

するために MBC が搭載されている。飛翔前の  $M_R$  の測定値は、MBC 設定値 =  $0.02(\text{AT}-\text{m}^2)$  [コマンドデシマル値 50]、スピン軸方向  $M_z = -0.3(\text{AT}-\text{m}^2)$  であったので、MBC を  $0.42(\text{AT}-\text{m}^2)$  [同 59] に設定することによって、 $M_z$  を極力小さく抑えた状態 [ $M_z = 0.03(\text{AT}-\text{m}^2)$ ] で打ち上げた。飛翔後のドリフト実験は MBC の設定値をコマンドで変えて表 6 に示すような経過で行なった。図 21 にドリフトのようすを示す。ここで、①～④では MBC にそれぞれ表 6 に示した値を与えた場合のドリフトのようすが観測される。また⑤では、太陽の赤経の変化に追従させるために必要な  $M_R$  の値を上述の理論計算により算出し、この値を MBC で設定 [=  $0.16(\text{AT}-\text{m}^2)$ ] した場合であり、図より太陽の赤経の変化に追従していることが解る。この場合、姿勢計算によるまでもなく、機上制御の動作回数が殆んど零であることから、スピン軸が太陽に追従していることが確認できた。また、これらの実験結果は実際の MBC の設定値を用いて行なった計算機シミュレーションとほぼ一致することが判明した。

表 6 MBC によるドリフト実験

	日時 (UT)	MBC- $M_z$ ( $\text{AT}-\text{m}^2$ )
①	7/7 3:00	- 0.17 (デシマル 46)
②	7/8 3:00	- 0.71 ( " 34)
③	7/9 1:30	0.93 ( " 72)
④	" 8:20	0.42 ( " 59)
⑤		0.16 ( " 52)

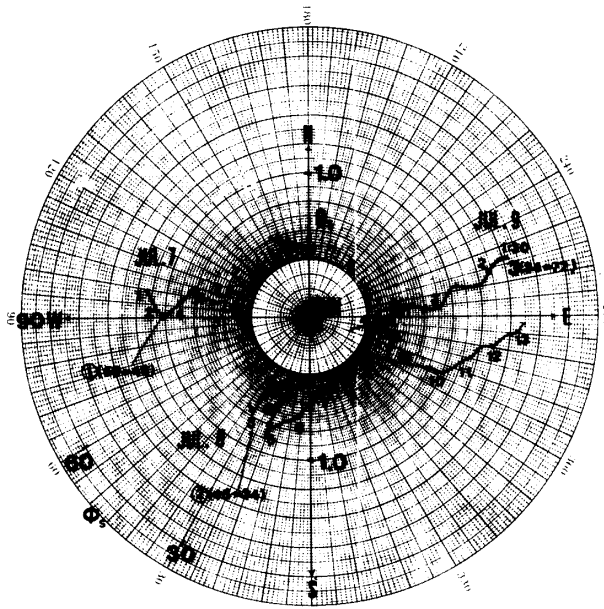


図 21-1 ドリフト実験結果

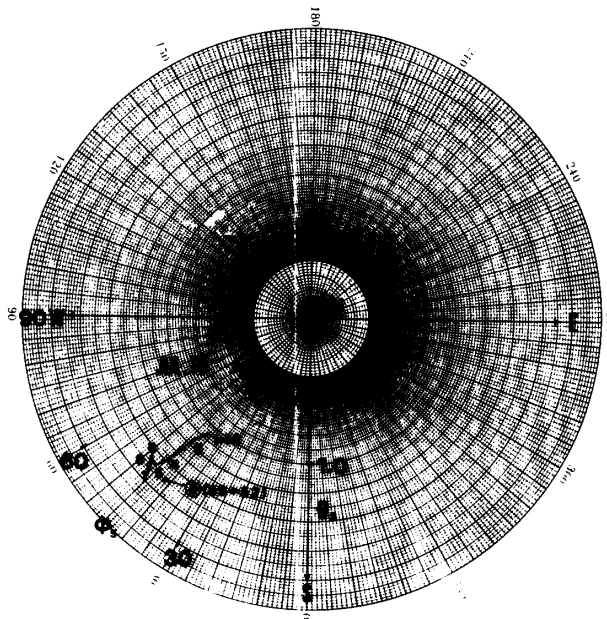


図 21-2 ドリフト実験結果

以上まとめると「ひのとり」のドリフトについて次の事が明らかになった。

- (1) ドリフトの主要因は残留磁気モーメントによるものである。
- (2) 飛翔後の残留磁気モーメントは約  $0.4 \pm 0.1$  ( $\text{AT-m}^2$ ) と推定される。
- (3) 姿勢ドリフトが主に残留磁気モーメントによるものであれば、MBCによる補正が有効であることが実証できた。

いずれにせよ、「ひのとり」の磁気モーメントのZ方向成分は、飛翔前試験より  $0.4 \pm 0.1$  ( $\text{AT-m}^2$ ) 変化したことになるが、その原因の明確な説明はつかない。しいていえば、原因としては次の2点が考えられる。

(a) 飛翔後の検討で解ったことであるが、飛翔前の磁気試験では装置そのものは十分較正してあるが、衛星の磁気モーメントを測定する場合には、5章で述べたような点について十分な注意を払わなければ測定結果に誤差が生ずる。「ひのとり」については、この点について測定経験が浅かったともいえる。しかし、このような事情があるにせよ、 $0.4 \pm 0.1$  ( $\text{AT-m}^2$ ) の残留磁気モーメントの変化を説明するには考えられる測定誤差は小さすぎるので、この変化は単に測定誤差に起因するものとは思われない。

(b) 磁気試験時の着磁状態が打ち上げの衝撃によって変化することが考えられるが、推定された値ほど変化するか否か疑問である。

この件に関しても、各サブシステムの集合体としての磁化状態や大きさ・方向を定量的に算出するのは困難だと思われるので、実際の衛星や疑似衛星を使用して衝撃試験前後に種々の特性を測定することが望ましい。

## 7. 結 言

磁気試験及びドリフト実験を通して以下の事が明らかになった。

(1) 改造された磁気試験装置は比較的雑音の多い環境においても最小値  $0.05 \text{ (AT-m}^2\text{)}$  までの磁気モーメントの測定が可能であることが確認できた。また、マイクロコンピュータによるリアルタイムデータ処理により、測定及びデータ処理時間の短縮ならびにデータ平均による実際上の測定精度の向上が計られた。

(2) (1)に関連して、衛星の磁気試験を行なう上で、5章に述べた測定誤差要因に対して十分注意を払う必要がある。

(3) 「ひのとり」の姿勢ドリフトの主要因は残留磁気モーメントによるものである。この残留磁気モーメントによるドリフトはMBCにより補正されることが立証でき、さらに、MBCの値を適当に設定することにより、太陽の赤経の変化に追尾させるといったきめ細かい調節が可能となった。

なお、本報告で説明した磁気試験装置は、衛星の磁気姿勢制御装置の試験には十分な性能をもつものであるが、姿勢制御のために搭載される磁力計のバイアス較正や深宇宙での磁場測定ミッション機器などのためには、必要精度を確保する上で、

(1)フラックスタンク (2)三軸ヘルムホルツコイル (3)シールドルーム

等の磁場計測設備を逐次整備していくことが不可欠であることを再記 [6] しておきたい。また、日頃御指導頂いている野村民也、林 友直、平尾邦雄各教授他、「ひのとり」のドリフト実験に寄与を賜った近藤一郎客員教授および「ひのとり」の磁気試験及びドリフト実験に参加されたメンバー各位に改めて深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- [1] 斉藤成文他, 科学衛星磁気試験装置, 東大宇宙研報告 724, 7, 1971
- [2] J.E. Everett and J.E. Osmeikhian, Spherical Coils for Uniform Magnetic Fields, J.Sci. Fnstram., Vol 43 1966
- [3] 竹山説三, 電磁気学現象理論, P 273, 丸善
- [4] 近藤, 二宮, 広川, 第7号科学衛星「ひのとり」のスピンの運動と磁気能率, 第25回宇宙科学技術連合講演会予稿集 p 224~225
- [5] 小田, 小川原他, 太陽 X 線の観測, M-3S-2/ASTRO-A 飛翔実験計画書(宇宙研), p 247~288 55年12月
- [6] 平尾他, 飛翔体による磁場計測に必要な地上系設備について, 宇宙研報告 特集2号, p 73~80 1982年3月